



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

PEA - LABORATÓRIO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

LÂMPADAS ELÉTRICAS

Código: LAM

ÍNDICE

1. Conceitos Básicos de Fotometria e da Ação da Luz sobre o Olho	03
1.1 Curva de Sensibilidade do Olho Humano	03
1.2 Fluxo Luminoso.....	04
1.3 Eficácia Luminosa.....	05
1.4 Cor	05
2. Tipos de Lâmpadas	07
2.1 Lâmpadas Incandescentes	07
2.1.1 Classificação das Lâmpadas Incandescentes	08
2.1.2 Lâmpada Incandescente Convencional	08
2.1.3 Lâmpadas Incandescentes Halógenas	11
2.2 Lâmpadas à Descarga.....	15
2.2.1 Lâmpadas à Descarga de Baixa Pressão.....	17
2.2.2 Lâmpadas à Descarga de Alta Pressão.....	34
2.2.3 Lâmpadas de Vapor de Mercúrio de Alta Pressão.....	35
2.2.4 Lâmpada de Vapor de Sódio de Alta Pressão	39
2.2.5 Lâmpada de Vapores Metálicos.....	45
3. Bibliografia	47

LÂMPADAS ELÉTRICAS

O objetivo deste texto é fornecer as informações básicas do princípio de funcionamento e campos de aplicação dos diversos tipos de lâmpadas comercialmente disponíveis atualmente para aplicações de iluminação de interiores e exteriores.

1. CONCEITOS BÁSICOS DE FOTOMETRIA E DA AÇÃO DA LUZ SOBRE O OLHO

A luz pode ser definida como a energia radiante ou radiação eletromagnética que, ao penetrar no olho humano, produz uma sensação de claridade.

Lâmpadas elétricas são dispositivos que transformam energia elétrica em luminosa.

Antes de iniciar a descrição do princípio de funcionamento de cada tipo de lâmpada, serão apresentados alguns conceitos básicos de fotometria, com o objetivo de fornecer subsídios para se poder comparar entre si os diversos tipos de lâmpadas sob o ponto de vista de eficiência e qualidade do processo de emissão de luz.

1.1 Curva de sensibilidade do olho humano

O olho humano apresenta uma estrutura complexa, cujos detalhes não estão no escopo deste texto. Basicamente, é constituído por uma lente (cristalino) que focaliza a luz sobre a retina, que funciona como um transdutor, ou seja, transforma sinais luminosos em sinais elétricos, levados ao cérebro através do nervo ótico. A retina possui dois tipos de terminações nervosas: a) os bastonetes, sensíveis a baixos níveis de intensidade luminosa, não são capazes de diferenciar as cores e b) os cones, responsáveis pela discriminação dos detalhes finos da imagem e da cor, mas que não conseguem atuar quando o nível de iluminamento é muito baixo. Ambas as terminações se encontram concentradas numa pequena região da retina conhecida por fóvea, sobre a qual o cristalino, controlado pela musculatura do olho, focaliza a luz incidente.

O olho humano tem uma capacidade de percepção restrita a uma faixa estreita de comprimentos de onda entre 380 nm e 760 nm da luz incidente e sua sensibilidade depende do comprimento de onda. A partir de ensaios realizados pelo CIE

(Commission Internationale de l'Eclairage) com um grande número de observadores com visão considerada normal, foi levantada uma curva da sensibilidade do olho humano em função do comprimento de onda reproduzida na figura 1.

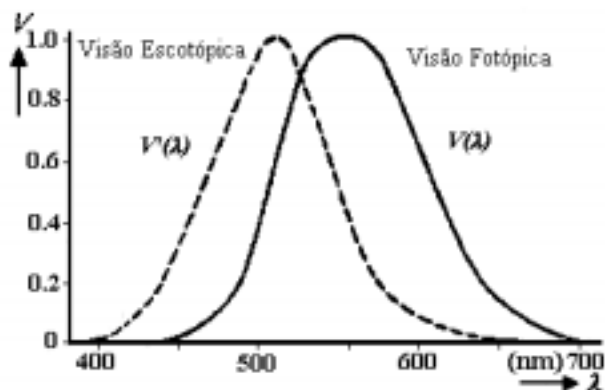


Figura 1 - Curva de sensibilidade do olho humano

A curva é normalizada no ponto de máxima sensibilidade do olho, correspondente a um comprimento de onda de 555 nm (amarelo esverdeado), e indica as diferentes sensações de claridade que os vários comprimentos de onda, com mesma intensidade de radiação, causam sobre olho humano. A sensibilidade do olho, conforme já mencionado acima, depende do nível de iluminamento, existindo uma curva para visão noturna (visão escotópica) e outra para diurna (visão fotópica).

1.2 Fluxo luminoso

Uma fonte de luz geralmente emite radiação em todos os comprimentos de onda. Define-se **fluxo radiante f_e** , medido em **Watt (W)**, como a potência emitida ou recebida sob forma de radiação.

Como já foi mencionado, o olho humano consegue ser sensibilizado, de forma seletiva, por radiações compreendidas numa faixa muito restrita do espectro global.

Define-se **fluxo luminoso f** , medido em **lúmen (lm)**, como uma grandeza derivada do fluxo radiante, que exprime a sua aptidão de produzir uma sensação luminosa no olho através do estímulo da retina ocular, avaliada segundo os valores de sensibilidade luminosa relativa admitidos pelo CIE. O fluxo luminoso é obtido a partir da radiação total emitida por uma fonte de acordo com sua ação sobre o observador padrão CIE, cuja curva de sensibilidade encontra-se na figura 1. Formalmente:

$$\phi = \int_0^{\infty} v(\lambda) \frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda} d\lambda$$

na qual: $df_e(\lambda)/d\lambda$ - Distribuição espectral do fluxo radiante;

$V(\lambda)$ - Curva de sensibilidade luminosa da CIE;

λ - Comprimento de onda;

1.3. Eficácia luminosa

Define-se **Eficácia luminosa** de uma lâmpada, medida em **lúmen/Watt (lm/W)**, como a razão entre o fluxo luminoso total emitido e a potência elétrica total consumida pela mesma. A eficácia luminosa é uma medida de eficiência do processo de emissão de luz, sendo utilizada para comparar as diversas lâmpadas entre si sob o aspecto de eficiência energética.

1.4 Cor

A cor é um aspecto subjetivo da sensação visual na região fotótica, ou seja, na presença de níveis de iluminamento suficientes, que depende da distribuição espectral da luz incidente no olho humano.

Existem diversas definições para o termo **Cor**. A seguir serão apresentadas duas: a) A cor determina a característica da luz que permite um observador distinguir diferenças entre duas fontes de luz de mesmo tamanho, forma e intensidade e b) A cor é uma característica da luz refletida ou transmitida por um objeto iluminado por uma fonte padrão CIE e captada por um observador que possui as características de sensibilidade da figura 1 (observador padrão CIE).

Existem vários sistemas de avaliação de cores, entre eles o sistema Munsell e o CIE.

O sistema CIE baseia-se no fato de que o olho humano apresenta três tipos de receptores (cones) distintos, que possuem a sua máxima sensibilidade cromática para azul, verde e vermelho. Para efeito de visão das cores, o olho humano pode ser substituído por uma combinação de três fotocélulas, associadas a filtros com sensibilidades espectrais para as três cores básicas acima.

Sob o ponto de vista da iluminação, as qualidades de cor de uma lâmpada são caracterizadas por duas atribuições: a) a aparência da cor, descrita pela sua temperatura de cor e b) a sua capacidade de reprodução de cor, que afeta a aparência da cor de objetos iluminados pela mesma.

A luz emitida por uma lâmpada deve se aproximar, da melhor forma possível, da radiação emitida por um corpo negro, ou seja, todos os comprimentos de onda devem estar presentes numa combinação adequada. O corpo negro é um componente idealizado que emite radiação com distribuição espectral contínua e dependente de sua temperatura.

Convém lembrar que a percepção à cor é um reconhecimento feito pelo cérebro, que aprendeu a interpretar o estímulo visual enviado pelos olhos quando focalizam objetos iluminados pela luz do dia, ou seja, pela luz solar. Esta pode ser aproximada pela radiação emitida por um corpo negro a uma temperatura muito elevada. Quaisquer desvios tornam a luz subjetivamente desagradável para o ser humano.

Define-se **Temperatura de Cor Correlata (Tc)** de uma fonte luminosa, como sendo a temperatura de um corpo negro, emitindo uma radiação, cujas características de cor mais se aproximam às da luz produzida pela fonte em questão. As propriedades de cor são avaliadas utilizando-se o diagrama de cromaticidade do CIE, cujos detalhes podem ser encontrados na bibliografia.

As lâmpadas de luz branca podem, a grosso modo, ser divididas em três grupos, de acordo com a sua cor aparente, medida pela temperatura de cor correlata (**Tc**): a) para $T_c > 5000$ K a luz é branca fria (branca azulada); b) para 3300 K $< T_c < 5000$ K a luz é branca intermediária e c) para $T_c < 3300$ K a luz é branca quente (branca avermelhada).

Nem sempre a luz emitida por lâmpadas elétricas atende perfeitamente o requisito acima, ou seja, a luz emitida não acompanha a curva de radiação de um corpo negro.

Para que um objeto, iluminado pela luz emitida por uma fonte artificial (lâmpada), apresente boa fidelidade de cores, a composição espectral da luz incidente deve ser adequada. Para esta finalidade foi criado um **Índice de Reprodução de Cores Ra**,

definido pelo desvio colorimétrico, avaliado segundo o diagrama de cromaticidade do CIE, da radiação refletida por um objeto iluminado pela fonte a ser analisada em relação a cor observada pelo mesmo objeto iluminado por uma fonte padrão de cromaticidade semelhante.

O CIE especifica uma escala de 0 a 100, onde o maior valor é atribuído a luz emitida por uma lâmpada incandescente padrão. Quanto maior o Índice de Reprodução de Cores, melhor o equilíbrio entre as cores.

Finalmente, é interessante ressaltar os efeitos psicológicos e fisiológicos da luz. A luz tem um influência direta, até o momento ainda sem explicação, sobre o estado emocional das pessoas. O vermelho e o amarelo produzem um sensação de calor e conforto; o azul causa uma impressão de frio e estímulo à atividade; já o verde induz ao descanso e relaxamento.

2. TIPOS DE LÂMPADAS

As lâmpadas comerciais utilizadas para iluminação podem ser classificadas, de acordo com o seu mecanismo básico de produção de luz, em lâmpadas incandescentes e lâmpadas de descarga.

2.1. Lâmpadas incandescentes

A lâmpada incandescente foi a primeira a ser desenvolvida e ainda hoje é uma das mais difundidas. O seu princípio de funcionamento baseia-se na emissão de luz por um corpo aquecido, no caso, um filamento de tungstênio percorrido por uma corrente elétrica alternada ou contínua.

Um corpo aquecido a baixas temperaturas emite radiação infravermelha proveniente da oscilação de átomos e moléculas. Em temperaturas mais elevadas ocorre excitação de átomos e a emissão de luz na faixa visível do espectro quando estes decaem para um estado de menor energia. Portanto, o filamento de uma lâmpada incandescente deve ser projetado para que a sua temperatura alcance a incandescência e a porcentagem da radiação emitida esteja na faixa do espectro visível.

As primeiras lâmpadas incandescentes surgiram por volta de 1840 e utilizavam filamento de bambu carbonizado no interior de um bulbo de vidro a vácuo. Seguiram-se as lâmpadas com filamento de carbono, até que, por volta de 1909, Coolidge desenvolveu um método para tornar o tungstênio mais dúctil e adequado para a elaboração de filamentos uniformes por trefilação.

A emissividade de um filamento incandescente de tungstênio é função do comprimento de onda. A menos da intensidade, que é aproximadamente 2.2 vezes menor, a característica espectral de emissão de um filamento de tungstênio incandescente é muito similar a de um corpo negro de mesmas dimensões e à mesma temperatura. No entanto, para uma mesma quantidade de radiação visível, o tungstênio apresenta apenas 76% da irradiação total de um corpo negro na mesma temperatura, ou seja, o tungstênio apresenta uma emissão muito inferior ao de um corpo negro nas faixas do ultravioleta e infra-vermelho. A característica de emissão, as propriedades mecânicas e o seu elevado ponto de fusão (3655 K) foram determinantes na escolha do tungstênio como o material mais adequado para fabricação filamentos para lâmpadas incandescentes.

2.1.1 Classificação das lâmpadas incandescentes

As lâmpadas incandescentes podem ser classificadas de acordo com a sua estrutura interna em: a) lâmpadas incandescentes convencionais e b) lâmpadas incandescentes halógenas.

2.1.2 Lâmpada incandescente convencional

As lâmpadas incandescentes convencionais são constituídas de um filamento de tungstênio, mantido no interior de um bulbo sob vácuo ou com uma atmosfera gasosa não halógena.

Comercialmente são classificadas de acordo com o seu campo de aplicação em:

a) Lâmpadas de médio e grande porte para orientação e iluminação geral de interiores e exteriores; b) Lâmpadas em miniatura para utilização em aplicações automotivas, sinalização, luminárias portáteis ou de uso especial c) Lâmpadas fotográficas para aplicações em projetores, estúdios e câmaras escuras e d) Lâmpadas infravermelhas para aquecimento e aplicações medicinais.

A seguir será apresentada em detalhe a lâmpada incandescente convencional para iluminação de interiores e uso doméstico.

A) Detalhes construtivos da lâmpada incandescente convencional para iluminação de interiores

A figura 2 apresenta os detalhes construtivos de uma lâmpada incandescente convencional. Nas lâmpadas comerciais, o filamento de tungstênio é geralmente sustentado por três a quatro suportes de molibidênio no interior de um bulbo de vidro alcalino (suporta temperaturas de até 370 °C) ou de vidro duro (suporta temperaturas de até 470 °C). O bulbo pode ter diversas formas, o mais comum tem formato de pêra, podendo ser transparente ou com revestimento interno de fósforo neutro difusor.

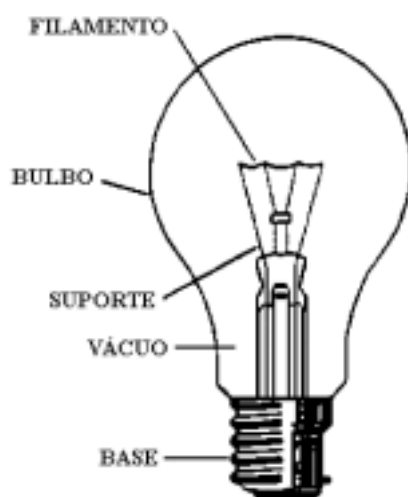


Figura 2 - Estrutura interna de uma lâmpada incandescente convencional

No interior do bulbo é realizado vácuo para se obter isolamento térmico. Alguns fabricantes introduzem um gás a pressão de aproximadamente 0.8 atm, em geral nitrogênio ou argônio, que envolve o filamento, formando uma atmosfera protetora para reduzir a taxa de sublimação e o depósito do tungstênio sobre a superfície interna do bulbo.

Nas lâmpadas incandescentes convencionais, utilizam-se filamentos enrolados em dupla espiral, conforme mostra a figura 3. Esta técnica construtiva visa aumentar a área radiante e otimizar o comprimento total do filamento para um dado valor de projeto de resistência elétrica.

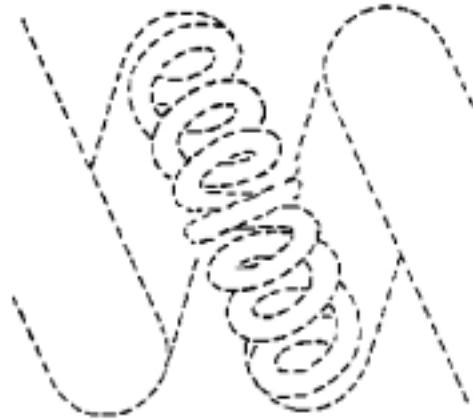


Figura 3 - Vista ampliada do filamento de uma lâmpada incandescente comercial

A base da lâmpada incandescente é constituída de uma caneca metálica, geralmente presa com resina epóxi sobre o bulbo. Existem diversas padronizações, por exemplo, baioneta e tele-slide, ambas utilizadas em lâmpadas miniatura. As lâmpadas incandescentes de médio e grande porte geralmente utilizam uma base que seguem um padrão conhecido por rosca Edison, que suportam temperaturas até 250°C.

B) Principais características das lâmpadas incandescentes influenciadas pela tensão de alimentação

A tensão de alimentação atua diretamente sobre a temperatura do filamento que, por sua vez, determina a vida útil da lâmpada incandescente.

Lâmpadas convencionais trabalham com temperaturas de filamento entre 2300 K e 2800 K. A eficácia luminosa resultante cresce com a potência de lâmpada, variando de 7 a 15 lm/W. Este valores são relativamente baixos, quando comparados com lâmpadas de descarga com fluxo luminoso semelhante. No entanto, esta limitação é compensada pelo índice de reprodução de cor elevado ($R_a=100$).

A resistência específica do tungstênio na temperatura de funcionamento da lâmpada (2800 K) é aproximadamente 15 vezes maior do que à temperatura ambiente (25°C). Portanto, ao ligar uma lâmpada incandescente, a corrente que circula pelo seu filamento a frio é quinze vezes a corrente nominal de funcionamento em regime. A temperatura do filamento sobe rapidamente, atingindo valores elevados em

frações de segundo. Ligações muito freqüentes reduzem a vida útil da lâmpada, pois o filamento geralmente não apresenta um diâmetro constante. A corrente de partida causa aquecimento excessivo e localizado nos pontos onde a seção do filamento apresenta constrictões, provocando seu rompimento. A vida útil de uma lâmpada incandescente comercial é da ordem de 1000 horas.

Cada tipo de lâmpada apresenta suas particularidades, mas as relações abaixo se aplicam com razoável precisão. Os valores nominais das grandezas estão indicados em letras maiúsculas.

$$\left[\frac{\text{vida útil(horas)}}{\text{VIDA ÚTILnom(horas)}} \right] = \left[\frac{\text{TENSÃOnom(V)}}{\text{tensão(V)}} \right]^{1,3}$$

$$\left[\frac{\text{fluxo luminoso(lm)}}{\text{FLUXO LUMINOSOnom(lm)}} \right] = \left[\frac{\text{tensão(V)}}{\text{TENSÃOnom(V)}} \right]^{3,4}$$

$$\left[\frac{\text{potência(W)}}{\text{POTÊNCIAnom(W)}} \right] = \left[\frac{\text{TENSÃOnom(V)}}{\text{tensão(V)}} \right]^{1,6}$$

$$\left[\frac{\text{EFICÁCIA LUMINOSAnom(lm / W)}}{\text{eficácia luminosa(lm / W)}} \right] = \left[\frac{\text{TENSÃOnom(V)}}{\text{tensão(V)}} \right]^{1,8}$$

$$\left[\frac{\text{temperatura de cor}}{\text{TEMPERATURA DE CORnom}} \right] = \left[\frac{\text{tensão(V)}}{\text{TENSÃOnom(V)}} \right]^{0,42}$$

2.1.3. Lâmpadas incandescentes halógenas

A lâmpada halógena é uma lâmpada incandescente à qual se adiciona um elemento halógeno, em geral iodo ou bromo.

O elemento halógeno reage quimicamente com as partículas de tungstênio sublimadas, formando haletos que apresentam uma temperatura de condensação inferior a 250°C. Mantendo-se a temperatura do bulbo acima deste valor, evita-se o depósito de material sublimado sobre o mesmo. Por outro lado, correntes térmicas transportam os haletos novamente para as regiões de alta temperatura, próximas ao filamento, onde ocorre a sua dissociação e o tungstênio retorna ao filamento. A

necessidade de elevadas temperaturas de filamento exige a presença de uma atmosfera protetora, geralmente uma mistura de nitrogênio com um gás inerte (argônio ou criptônio) na proporção de 0.1% a 1% do elemento halógeno, para reduzir a taxa de sublimação do tungstênio.

Para efeito de visualização das reações químicas, a secção da lâmpada pode ser dividida em três zonas de temperatura, conforme mostra a figura 4. Convém lembrar que o processo regenerativo não implica necessariamente no retorno dos átomos de tungstênio sublimados para o seu local exato de origem no filamento.

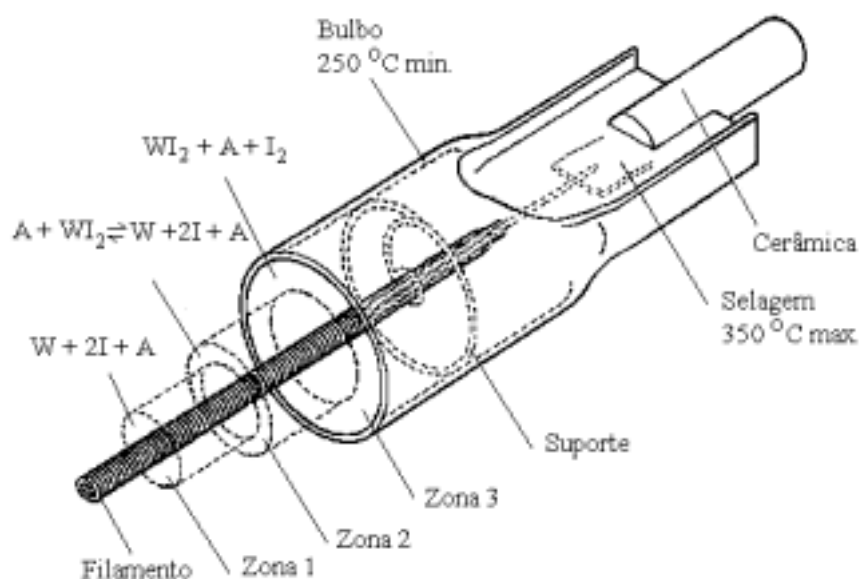


Figura 4 - Vista em corte de uma lâmpada incandescente halógena do tipo lapiseira

ZONA 1 - 2600°C < T < 3200°C

Dissociação dos haletos em tungstênio e halogênio na presença do gás de enchimento (argônio ou nitrogênio).

ZONA 2 - 800°C < T < 2600°C

Formação de haletos

ZONA 3 - 250°C < T < 800°C

Recombinação de átomos halógenos e presença de haletos

A) Características elétricas e construtivas de lâmpadas incandescentes halógenas

A lâmpada incandescente halógena apresenta um filamento de tungstênio enrolado em dupla espiral, conforme mostrado na figura 3, e sustentado por suportes de molibidênio no interior de um bulbo de quartzo, globular ou com formato de lapiseira. A base é, em geral, cerâmica para suportar temperaturas e pressões elevadas e além disso apresentar boa condutibilidade térmica, limitando a temperatura dos suportes de molibidênio em 350°C para evitar fenômenos de corrosão.

O ciclo halógeno só se torna eficaz: a) para temperaturas de filamento elevadas (3200K) e b) para uma temperatura da parede do bulbo externo acima de 250°C, evitando-se a condensação e o depósito dos haletos.

O bulbo de quartzo não deve ser tocado com a mão para evitar que depósitos de gordura na sua superfície externa provoquem pontos de desvitrificação, isto é, alterações na rede cristalina com elevado coeficiente de expansão térmica, que podem resultar em microfissuras e rompimento do bulbo.

Temperaturas de filamento elevadas só são atingidas com a circulação de um nível mínimo de corrente. Por esta razão, lâmpadas com potências inferiores a 50 W são alimentadas em baixa tensão, geralmente 12V ou 24V.

Lâmpadas halógenas emitem mais radiação ultravioleta que as lâmpadas incandescentes normais, uma vez que a sua temperatura de filamento é significativamente maior e o bulbo de quartzo não consegue absorver este tipo de radiação. Os níveis são inferiores aos presentes na luz solar, não oferecendo perigo à saúde. No entanto, deve-se evitar a exposição prolongada das partes sensíveis do corpo à luz direta e concentrada.

Como elemento halógeno é utilizado geralmente o iodo ou bromatos. O bromo é incolor e gasoso à temperatura ambiente, não absorvendo radiação visível.

As características construtivas das lâmpadas incandescentes halógenas permitem uma substancial redução no seu tamanho (da ordem de 10 a 100 vezes) em relação às suas similares convencionais. Sua eficiência é da ordem de 15 lm/W a 25 lm/W, para uma vida útil de 2000 horas. Seu custo ainda é significativamente maior que o

das lâmpadas incandescentes convencionais. As equações apresentadas no item 2.1.2.2 também se aplicam às lâmpadas halógenas.

C) Espelhos dicróicos

Devido ao seu volume reduzido, as lâmpadas halógenas são utilizadas em iluminação direcionada ("spot light"), porém a irradiação térmica emitida é bastante elevada. Por esta razão, certos tipos de lâmpadas são providos de um refletor espelhado especial, chamado dicróico, que reflete a radiação visível e absorve a radiação infravermelha. A figura 5 mostra a fotografia de duas lâmpadas de 50 W com espelho dicróico.

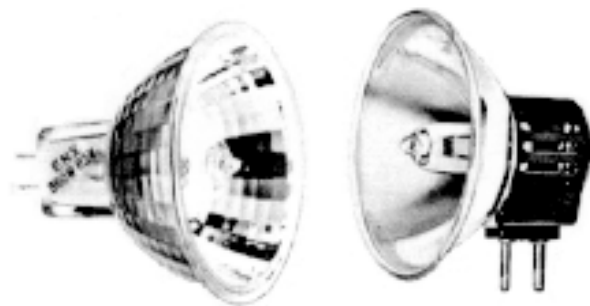


Figura 5 - Lâmpada incandescente halógena de 50W com refletor espelhado dicróico

O espelho dicróico consiste de uma base de vidro, sobre a qual são aplicadas, alternadamente, camadas com espessuras quase moleculares, de materiais translúcidos com índices de refração diferentes, por exemplo, um deles com índice refração de 1.5 (sílica) e outro com 2.3 (sulfato de zinco). Este arranjo provoca uma defasagem de 180° entre a radiação incidente e refletida para certos comprimentos de onda, resultando no seu cancelamento por interferência.

A radiação visível, que apresenta um comprimento de onda da ordem da metade da radiação infravermelha, é refletida e emitida em direção ao objeto a ser iluminado. Por outro lado, através da escolha adequada do material e das espessuras das camadas, a maior parte da radiação infravermelha é absorvida pelo espelho e eliminada pela base da lâmpada.

Com este tipo de espelho, consegue-se uma redução da ordem de 70% na radiação infravermelha, resultando um feixe de luz emergente "frio" ("cold light beam"), ou seja, que não aquece o ambiente.

2.2. Lâmpadas à descarga

Descargas elétricas em gases são sistemas físicos complexos de difícil modelagem, que podem ser classificadas em diversos tipos (descarga de Townsend, luminescente, etc) de acordo com suas propriedades elétricas, cada uma exibindo particularidades, cuja análise exigiria um tratamento individual. Felizmente, os tipos de descarga encontradas em lâmpadas são similares entre si, formadas por um plasma, ou seja, uma matéria eletricamente neutra, porém, constituída exclusivamente de partículas portadoras de carga elétrica. Suas propriedades são determinadas pela corrente elétrica, pela composição e pressão da mistura de gas(es) com vapor(es) metálico(s), a partir da qual são formados os íons.

Uma lâmpada à descarga apresenta um invólucro translúcido, conhecido como tubo de descarga, em cujas extremidades existem eletrodos, que podem ser hastes metálicas ou filamentos, cuja função é emitir elétrons quando aquecidos. No interior do tubo de descarga, encontra-se uma mistura de gases com vapor(es) metálico(s) a uma dada pressão. Ao se aplicar uma diferença de potencial externa, os elétrons emitidos pelo eletrodo negativo (catodo) são acelerados em direção ao eletrodo positivo (anodo), colidindo, no caminho, com os átomos do vapor metálico.

Colisões elásticas provocam aumentos de temperatura, sem quebrar a estabilidade do átomo, ao passo que as inelásticas provocam sua ionização. O decaimento do átomo para o seu estado de menor energia é acompanhado da emissão de radiação. Dependendo da sua distribuição espectral, esta radiação poderá ser utilizada como fonte de luz, caso contrário será absorvida por um revestimento, aplicado na parede interna do tubo de descarga e conhecido genericamente por "fósforo", que emite uma radiação com uma distribuição espectral mais adequada. A luz emitida pelas lâmpadas à descarga apresenta, em geral, uma distribuição espectral discreta, contendo as raias características dos átomos que compõem o vapor metálico.

Quando uma lâmpada incandescente é conectada a uma fonte de energia, a presença de um componente (filamento), **previamente condutor**, provoca a

circulação imediata de corrente elétrica, cuja amplitude acompanha, de forma contínua, às variações de tensão impostas pela fonte.

Nas lâmpadas à descarga existe, em geral, um meio gasoso, **inicialmente não condutor**, cujos átomos precisam ser excitados e/ou ionizados para haver circulação de uma corrente elétrica. Quando este tipo de lâmpada é conectada a uma fonte de baixa tensão, não há praticamente circulação de corrente. Por outro lado, aumentando-se a tensão da fonte acima de um limiar, em geral, de algumas centenas de Volts, ocorre a descarga e a corrente no circuito cresce bruscamente, podendo atingir valores elevados.

Lâmpadas à descarga necessitam, em geral, de dois dispositivos externos, um para realizar a sua ignição e outro para estabilização da corrente no seu valor nominal de operação.

A figura 6 mostra a curva estática de um tubo de descarga com 20" de comprimento e 1,5" de diâmetro contendo gás neon.

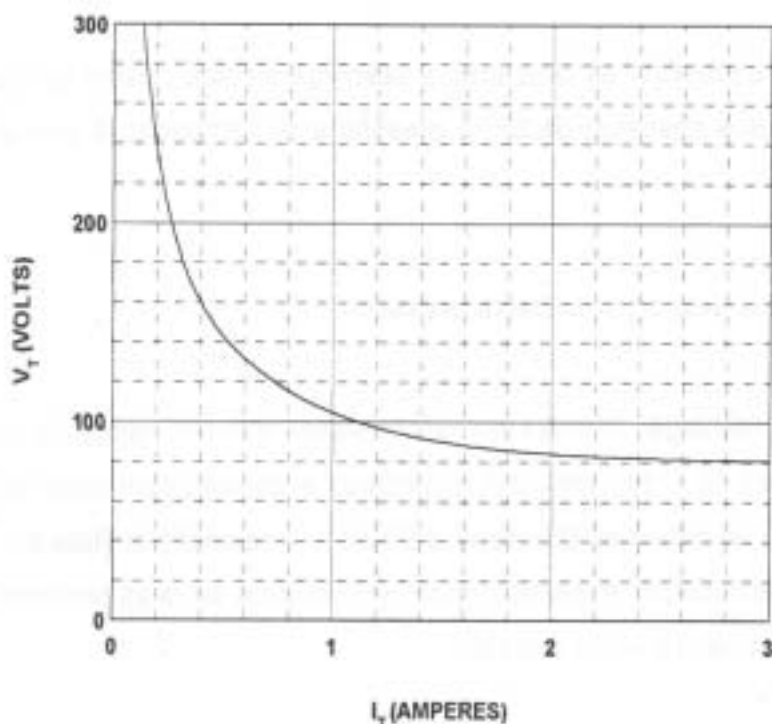


Figura 6 - Curva tensãoxcorrente estática de um tubo de descarga com gás neon

A curva estática, válida para alimentação de lâmpadas à descarga em corrente contínua (C.C.), é obtida alimentando-se a mesma com uma fonte de corrente ajustável, registrando-se os valores de tensão para cada valor de corrente, quando a

descarga atinge uma condição de equilíbrio. Pode-se verificar que a impedância dinâmica (derivada da tensão em relação à corrente) de uma lâmpada à descarga é negativa, ou seja, à medida que a corrente na lâmpada aumenta, a diferença de potencial entre os seus terminais diminui, até que, no limite, a lâmpada se torna praticamente um curto-circuito e a corrente assume valores elevados.

Portanto, pelas leis de Kirchhoff, toda lâmpada à descarga alimentada em corrente contínua necessita de um elemento com resistência positiva, por exemplo um resistor, para absorver a diferença de tensão entre a lâmpada e a fonte de alimentação de modo a limitar a corrente no circuito.

Lâmpadas à descarga também podem ser alimentadas em corrente alternada (C.A.). Nestas condições, a lâmpada é representada pela sua característica dinâmica, obtendo-se a partir desta, uma resistência média equivalente. Cada eletrodo assume a função de catodo e anodo em semiciclos consecutivos. Por questões de eficiência, a estabilização da corrente em corrente alternada não é feita com resistores, utilizando-se no seu lugar uma associação de elementos reativos (capacitores e indutores), evitando-se a dissipação desnecessária de potência ativa.

De acordo com a pressão, as lâmpadas à descarga elétrica podem ser classificadas em: a) Lâmpadas à descarga de baixa pressão e b) Lâmpadas à descarga de alta pressão.

2.2.1 Lâmpadas à descarga de baixa pressão

As lâmpadas à descarga de baixa pressão utilizam vapores metálicos (mercúrio ou sódio) a pressões da ordem de 10^{-3} atmosferas e operam com uma densidade de potência de arco da ordem de 0.5 W/cm a 2 W/cm. A radiação emitida pela descarga apresenta uma distribuição espectral, onde se destacam as raias predominantes dos átomos que constituem o vapor metálico.

Existem basicamente dois tipos de lâmpadas comerciais: A) as lâmpadas à descarga de baixa pressão de vapor de mercúrio, conhecidas como lâmpadas fluorescentes e B) as lâmpadas à descarga de baixa pressão de vapor de sódio.

A) Lâmpada fluorescente

Desenvolvida na década de 40 e conhecida comercialmente como lâmpada tubular fluorescente em função da geometria do seu tubo de descarga, este tipo de lâmpada encontra aplicações em praticamente todos os campos de iluminação. O tubo de descarga, de vidro transparente, é revestido internamente com uma camada de pó branco, genericamente conhecido como "fósforo". O "fósforo" atua como um conversor de radiação, ou seja, absorve um comprimento de onda específico ($\lambda=253.7$ nm) de radiação ultravioleta, produzida por uma descarga de vapor de mercúrio a baixa pressão, para emitir luz visível.

Detalhes construtivos e princípio de funcionamento

As lâmpadas fluorescentes comercialmente disponíveis utilizam bulbos de vidro transparente, historicamente designados por uma letra **T** (de tubular) seguida de um número que indica o seu diâmetro máximo em oitavos de polegada. Por exemplo, T12 significa um bulbo tubular com diâmetro de 12/8 polegadas.

O diagrama da figura 7 mostra a estrutura interna de uma lâmpada fluorescente tubular e ilustra o seu princípio de funcionamento.

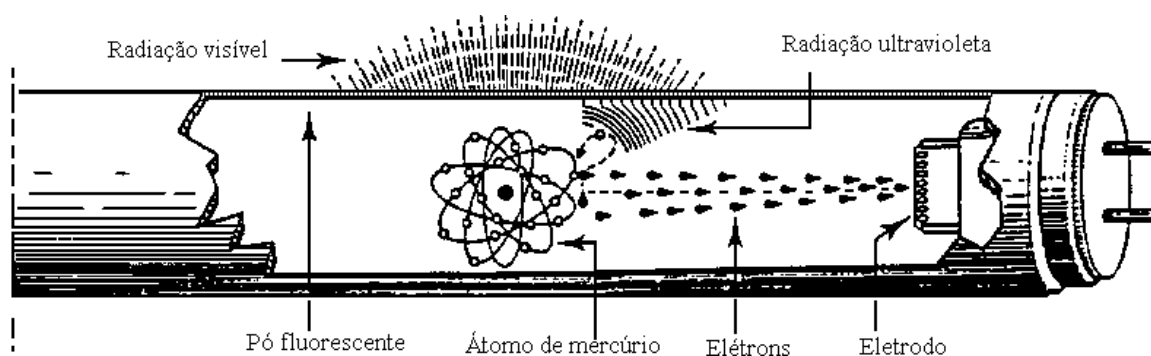


Figura 7 - Estrutura interna e princípio de funcionamento de uma lâmpada fluorescente tubular

Os eletrodos encontram-se hermeticamente selados no interior do tubo, um em cada extremidade. Existem basicamente dois tipos: a) o catodo frio, utilizado em lâmpadas com o mesmo nome e atualmente já fora de linha, é constituído de um cilindro metálico coberto com uma substância que emite elétrons, quando aquecida pelo próprio calor gerado na descarga e b) o catodo quente ou filamento, utilizado na quase totalidade das lâmpadas atualmente disponíveis.

Os filamentos das lâmpadas fluorescentes são construtivamente semelhantes aos das lâmpadas incandescentes, porém operam em temperaturas mais baixas (800 °C a 1100 °C) e apresentam um revestimento de material com baixa função de trabalho (por ex. óxido de bário) que emite elétrons por efeito termo-iônico. Durante a partida, os filamentos são alimentados por uma fonte de tensão, sendo aquecidos pela circulação da corrente, até atingir a temperatura de emissão desejada, a qual é mantida pelo calor gerado na descarga com a lâmpada já em funcionamento. Este procedimento é denominado pré-aquecimento dos filamentos. O pré-aquecimento influi na vida útil dos filamentos e, portanto, da própria lâmpada.

O funcionamento da lâmpada fluorescente depende do estabelecimento de uma descarga, entre os seus eletrodos, através do vapor de mercúrio. No entanto, à temperatura ambiente o mercúrio é líquido, o que dificulta a formação de íons. Por esta razão, adiciona-se um gás inerte com baixo potencial de ionização, que permite realizar a ignição da lâmpada e gerar calor para vaporizar o mercúrio. Este "gás de enchimento" ("filling gas"), é geralmente argônio puro ou uma mistura de argônio, neônio e criptônio.

Os elétrons emitidos por um dos filamentos (catodo) são acelerados em direção ao outro (anodo) pelo campo elétrico estabelecido por uma tensão externamente aplicada. Inicialmente forma-se uma descarga com o gás de enchimento. Os elétrons produzidos excitam os átomos do vapor de mercúrio, que emitem radiação ultravioleta, sensibilizando a camada de "fósforo" aplicada na parede interna do tubo. A escolha do tipo e da pressão do gás inerte influi na eficiência da lâmpada, pois o gás inerte atua como um moderador, ou seja, ajusta a velocidade média dos elétrons de forma a maximizar a produção de radiação ultravioleta com comprimento de onda $\lambda = 253.7 \text{ nm}$.

As características luminosas (temperatura de cor correlata, eficácia luminosa e reprodução de cores) da lâmpada fluorescente são determinadas pela composição e espessura do pó fluorescente ("fósforo"). Os "fósforos" são compostos que emitem luz por fluorescência quando expostos à radiação ultravioleta. São fabricados a partir de compostos de elevada pureza, cuja estrutura cristalina é modificada pela adição de ativadores, que determinam a distribuição espectral da radiação emitida.

Uma família amplamente utilizada são os halofosfatos cuja composição química básica é: $3\text{Ca}(\text{PO}_4)_2\text{CaF}_2$. Na década de 80 foi desenvolvida uma nova família de

"fósforos", conhecida comercialmente como "tri-fósforo" ou "fósforo tri-estímulo", que é constituída de três compostos, cada um com banda de emissão estreita e centrada nos comprimentos de onda do azul, vermelho e verde respectivamente. A combinação adequada destes compostos, juntamente com uma camada de halofosfato, possibilitou uma melhora no índice de reprodução de cores e um aumento considerável na eficácia luminosa, ou seja, permitiu a construção de lâmpadas com menor potência para emissão do mesmo fluxo luminoso. As lâmpadas fluorescentes de nova geração utilizam um tubo com diâmetro menor (T8 em vez de T12) e seu custo, mais elevado em função do tri-fósforo, é compensado pelo aumento de eficiência resultante.

A Tabela 1 apresenta as principais características de algumas lâmpadas fluorescentes e incandescentes. Pode-se verificar que : a) as lâmpadas fluorescentes são aproximadamente 6 vezes mais eficientes que as incandescentes; b) as lâmpadas fluorescentes apresentam uma vida útil 8 vezes superior às incandescentes e c) as lâmpadas fluorescente com tri-fósforo são mais eficientes que as com halofosfato e apresentam um índice de reprodução de cores mais elevado, porém ainda inferior às incandescentes.

Tipo de Lâmpada	Fluorescente		Incandescente	
	Halofosfato(T12)	Tri-fósforo(T8)		
Potência (W)	40	36	60	100
Fluxo luminoso (lm)	3150	3275	730	1380
Eficácia lum.(lm/W)	78.7	90.9	12	13.8
Vida útil (horas)	8000	8000	1000	1000
Índ. Reprod. Cores	62	82	100	100

Tabela 1 Características de algumas lâmpadas fluorescentes e incandescentes

As lâmpadas fluorescentes tubulares são utilizadas para iluminação de interiores em instalações comerciais, industriais e residenciais. A lâmpada fluorescente não oferece riscos à saúde, pois a quase totalidade da radiação ultravioleta emitida pela descarga é absorvida pelo pó fluorescente e pelo vidro do tubo de descarga.

Alimentação de lâmpadas fluorescentes em corrente alternada de 50/60Hz

A maioria das instalações de iluminação com lâmpadas fluorescentes são alimentadas em corrente alternada na frequência usual de rede (50 Hz ou 60 Hz). Para estabilização da corrente da lâmpada utiliza-se um dispositivo, conhecido popularmente por reator (em inglês "ballast"). Existem várias configurações, desde simples indutores até sofisticados circuitos eletrônicos.

O reator deve realizar basicamente três funções:

- a) possibilitar a ignição da lâmpada
- b) estabilizar a corrente da lâmpada no seu valor nominal de operação
- c) atender às especificações da forma de onda normatizadas para a corrente da lâmpada

As normas de lâmpadas fluorescentes especificam que a corrente na lâmpada, operando em regime permanente, deve ter um fator de crista inferior a 1.8 para limitar a taxa de sublimação da camada de óxido emissor dos filamentos. O fator de crista é o quociente do valor de pico da forma de onda pelo seu valor eficaz (também conhecido como valor RMS ou valor quadrático médio).

A maioria dos reatores comerciais no Brasil são constituídos basicamente de bobinas com um núcleo, obtido pelo empilhamento de chapas de ferro-silício, apresentando, portanto, características indutivas. Podem ser simples indutores ou transformadores com características especiais.

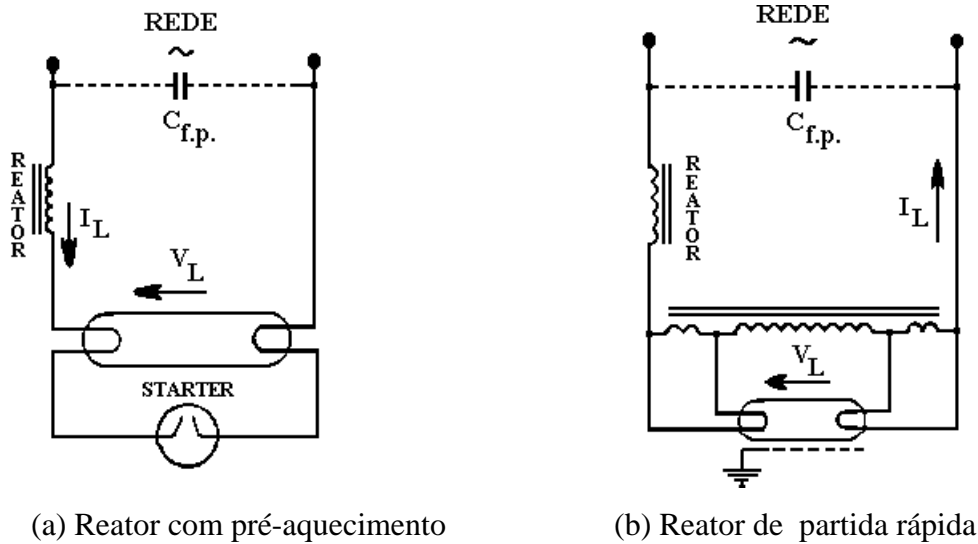
A tensão sobre um indutor ideal em função da corrente obedece a relação $v(t)=Ld(i)/dt$ onde L é uma constante denominada indutância. Portanto, variações de corrente impostas pelo circuito externo são transformadas pelo indutor em uma diferença de potencial entre os seus terminais, que é proporcional à taxa de variação da corrente. Em corrente alternada, o indutor funciona como um dispositivo que oferece resistência às variações de corrente, justificando sua escolha como elemento de estabilização para lâmpadas à descarga. Um indutor real pode ser representado por um indutor ideal em série com a resistência elétrica (do fio de cobre) da bobina, sendo que esta última determina a potência dissipada (em Watts) pelo conjunto.

Os reatores indutivos para lâmpadas fluorescentes tubulares são, em geral, classificados de acordo com o tipo de ignição em:

- a) reatores com pré-aquecimento (utilizando "starter"), mostrado na figura 8a;

b) reatores de partida rápida, apresentado na figura 8b.

Alguns reatores comerciais podem apresentar diferenças construtivas em relação aos esquemas apresentados na figura 8, os quais não alteram o princípio de funcionamento básico, cujos detalhes serão apresentados na seqüência.



(a) Reator com pré-aquecimento

(b) Reator de partida rápida

Figura 8 - Reatores indutivos para lâmpadas fluorescentes tubulares

1. Reator com pré-aquecimento (utilizando "starter")

Os reatores para lâmpadas fluorescentes que realizam pré-aquecimento dos filamentos são simples indutores, que operam em conjunto com um dispositivo de chaveamento, que pode ser do tipo mecânico (chave liga/desliga) ou térmico ("starter").

O valor de pico das tensões de alimentação C.A. fornecidas pelas concessionárias de energia elétrica é, em geral, significativamente inferior à tensão de ignição, na temperatura ambiente, para a grande maioria das lâmpadas fluorescentes tubulares.

Uma maneira de reduzir a tensão de ignição da lâmpada é realizar um pré-aquecimento dos seus filamentos, que passam a emitir elétrons livres, reduzindo a rigidez dielétrica (capacidade de suportar tensão) da coluna gasosa entre os eletrodos. Este processo é iniciado com o fechamento da chave em paralelo com a lâmpada, conforme indicado na figura 8a. Desta forma, os filamentos da lâmpada são conectados em série e alimentados pela tensão C.A., para permitir a circulação de uma corrente elétrica (de 0.8 A a 1.2 A), cujo valor é determinado pelo reator.

Quando os filamentos atingem a incandescência, a chave é aberta, interrompendo a corrente no circuito. A variação brusca da corrente provoca uma diferença de potencial momentânea e de valor elevado ($v(t) = L di(t)/dt$) entre os terminais do reator, que, somada à tensão C.A. naquele instante, será aplicada sobre a lâmpada provocando a ignição da descarga.

A maioria das instalações que adotam esta técnica utilizam uma chave térmica, denominada "starter", mostrada em detalhe na figura 9. O "starter" é constituído de uma ampola de vidro (aproximadamente 20 mm de comprimento e 10 mm de diâmetro), contendo um gás (em geral neônio ou hélio) a uma certa pressão, além de dois contatos separados entre si. Um contato é fixo em forma de haste e o outro, constituído de uma lâmina bimetálica em forma de U, é móvel. O elemento bimetálico é obtido, laminando-se duas chapas metálicas com coeficientes de dilatação térmica significativamente diferentes.

O princípio de funcionamento do reator com "starter" é similar à seqüência de eventos descrita anteriormente. A tensão da rede C.A., insuficiente para realizar a ignição da lâmpada, consegue abrir um arco de baixa resistência elétrica entre os contatos do "starter", provocando a circulação de corrente pelos filamentos. O calor gerado pelo arco deforma a lâmina bimetálica, aproximando-a da haste fixa até estabelecer contato mecânico. Neste instante o "starter" se comporta como um curto-circuito, extinguindo o arco. Na ausência do arco a lâmina bimetálica esfria rapidamente, afastando-se do contato fixo.

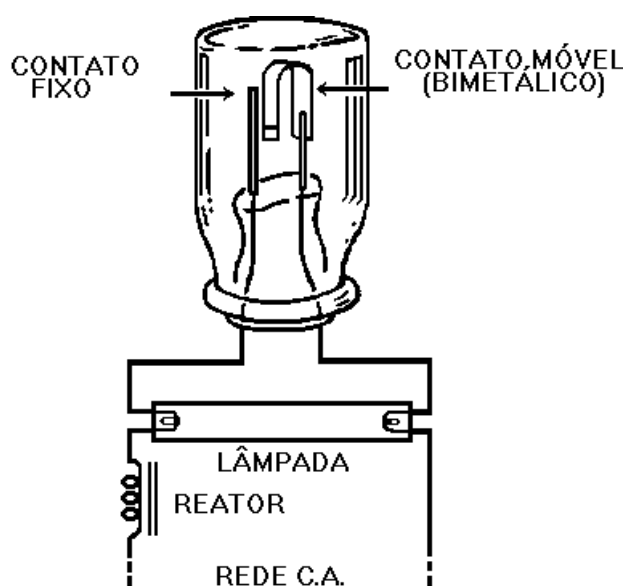


Figura 9 - Reator com pré-aquecimento - Detalhe do "starter"

Quando os contatos do "starter" se separam, ouve-se um "clic" característico. A interrupção brusca da corrente provoca uma tensão de valor elevado entre os eletrodos da lâmpada que pode ou não provocar a ignição da descarga. Em caso afirmativo, o "starter" permanecerá em circuito aberto, pois a tensão da lâmpada acesa é insuficiente para abrir um arco entre os seus contatos. Caso contrário, o ciclo de pré-aquecimento se inicia novamente.

A partida da lâmpada demora, em geral, alguns segundos e a escolha do "starter" é feita em função da tensão da lâmpada. O sucesso da ignição da lâmpada após o primeiro ciclo de pré-aquecimento depende, entre outros fatores, da temperatura ambiente e da umidade atmosférica. Em ambientes frios e úmidos são, em geral, necessários três a seis ciclos.

A partida com pré-aquecimento implica na utilização de um conjunto individual, formado por reator e "starter", para cada lâmpada.

2. Reator de partida rápida

Os reatores de partida rápida não utilizam "starter". Portanto, para se garantir a partida da lâmpada, esta topologia deve aplicar um valor de tensão suficientemente elevado para realizar a partida da lâmpada (numa ampla faixa de temperatura ambiente) ou reduzir a tensão de ignição da lâmpada de alguma forma.

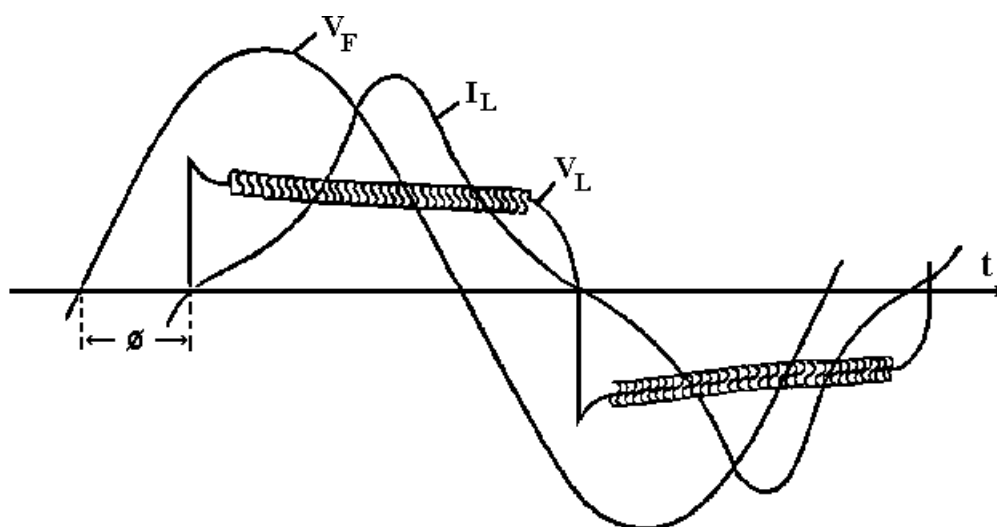
Estes reatores utilizam um transformador, cujos enrolamentos encontram-se magneticamente acoplados com um indutor, para realizar o aquecimento adequado dos filamentos de forma a reduzir a tensão de ignição da lâmpada para valores próximos da tensão C.A. de alimentação. A figura 8b mostra um versão simplificada desta configuração.

O transformador dispõe de enrolamentos de baixa tensão (3V a 4V), ligados em série com o enrolamento secundário, aos quais são conectados os filamentos. Ao contrário dos reatores com pré-aquecimento, existe circulação permanente de corrente pelos filamentos, cujo valor é significativamente reduzido, após a ignição da lâmpada, pelo aumento da resistência dos filamentos com a temperatura e pela queda de tensão no indutor, imposta pela circulação de corrente na lâmpada.

A ignição da lâmpada ocorre em menos de 1 segundo, justificando a denominação "partida rápida". Para o bom funcionamento, é necessária uma superfície metálica plana e aterrada, de mesmo comprimento da lâmpada e disposta a uma distância não superior a 25 mm da mesma. Em geral utilizam-se luminárias metálicas, as quais devem ser adequadamente aterradas. A presença de uma superfície equipotencial aterrada sob a lâmpada possibilita uma distribuição de cargas estáticas na parede do tubo, que altera a distribuição de potencial entre os eletrodos, reduzindo ainda mais a tensão de ignição da lâmpada.

A maioria dos reatores de partida rápida comerciais alimentam duas lâmpadas fluorescentes ligadas em série. Por esta razão utilizam um transformador elevador de tensão com enrolamentos para alimentar os filamentos de ambas as lâmpadas.

A figura 10 apresenta as formas de onda de tensão (V_L) e corrente (I_L) na lâmpada, bem como da tensão de alimentação (V_F), válidas somente para reatores indutivos, independente da sua configuração.



(V_L) Tensão sobre lâmpada, (I_L) Corrente na lâmpada, (V_F) Tensão de alimentação

Figura 10 - Formas de onda, válida para reatores indutivos

A tensão sobre a lâmpada tem um formato aproximadamente retangular e apresenta oscilação de frequência elevada superposta, devido a instabilidades da descarga nas proximidades da região anódica.

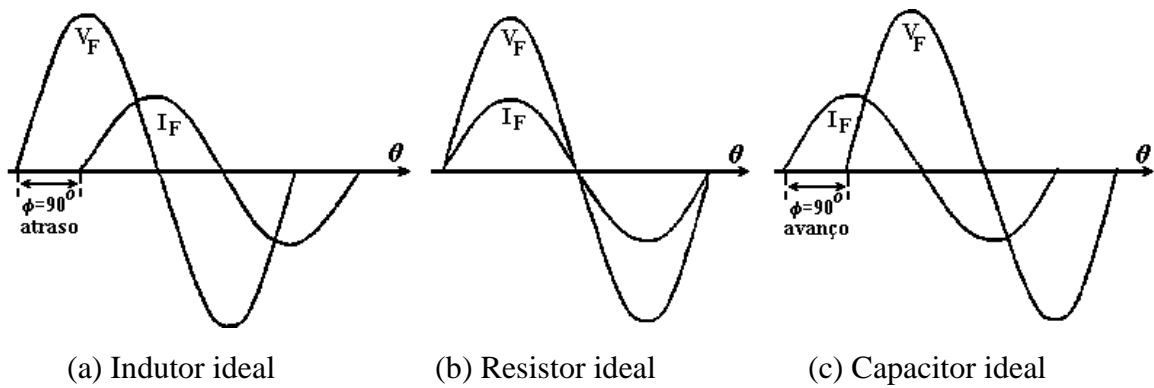


Figura 11 - Formas de tensão e corrente em diversos tipos de carga alimentadas em C.A.

A figura 11 apresenta as formas de onda de tensão e corrente em diversos tipos de carga, alimentadas por uma fonte de tensão senoidal. Nas cargas puramente resistivas, tensão e corrente estão em fase. Por outro lado, em cargas puramente indutivas (ou capacitivas) a corrente absorvida está atrasada (ou adiantada) em relação a tensão de alimentação.

Define-se potência ativa P , medida em Watt (W), pela expressão:

$$P = V I \cos f$$

na qual: V é o valor eficaz da tensão de alimentação;

I é o valor eficaz da corrente absorvida;

f defasagem da corrente em relação à tensão.

Esta fórmula só se aplica para circuitos onde a tensão e a corrente são perfeitamente senoidais. Nestas condições, define-se fator de potência ($\cos f$) como o quociente da potência ativa (P) pelo produto (VI) dos valores eficazes de tensão e corrente.

Em circuitos resistivos com componentes ideais, o fator de potência é unitário ($\cos f=1$), ou seja, a corrente fornecida pela fonte de alimentação é utilizada integralmente para transportar potência ativa para a carga. Já em circuitos capacitivos ou indutivos ideais, existe circulação de corrente da fonte para a carga, porém a potência ativa na carga é nula, pois $f=90^\circ$. Em circuitos reais, a corrente provoca aquecimento nos cabos que ligam a fonte com a carga, uma vez que os mesmos apresentam característica resistiva.

As concessionárias de energia elétrica têm o máximo interesse que os seus condutores sejam aproveitados da melhor forma possível, isto é, que a corrente circulante seja utilizada exclusivamente no transporte de potência ativa para a carga.

Pela figura 10 pode-se verificar que a corrente da lâmpada (I_L) não é perfeitamente senoidal, porém as considerações a seguir permanecem válidas. No caso, (I_L) é a própria corrente de alimentação e está atrasada em relação à tensão de alimentação (V_F). Portanto, como esperado, o reator apresenta o comportamento de uma carga resistivo-indutiva. Os modelos comerciais de reatores, sem compensação, possuem um fator de potência da ordem de 0.5.

Para se aumentar o fator de potência em reatores, utiliza-se uma técnica denominada compensação, que consiste em adiantar a corrente, de forma a minimizar a sua defasagem em relação à tensão de alimentação. Geralmente utiliza-se um capacitor (C_{FP}), que é conectado entre os terminais da alimentação C.A., conforme mostra a figura 8. Alguns reatores de partida rápida comerciais já apresentam um capacitor de compensação interno e o seu fator de potência é da ordem de 0.9.

Reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes tubulares

Reator eletrônico é a denominação popular de um equipamento que converte a tensão de rede (50 Hz ou 60 Hz) em uma tensão de alta frequência (acima de 18 kHz), adequada para alimentar lâmpadas fluorescentes.

Lâmpadas fluorescentes, operando na sua potência nominal, apresentam uma elevação de fluxo luminoso de 6% a 12%, em relação ao valor obtido na frequência da rede, quando alimentadas em alta frequência (acima de 5 kHz) com tensão senoidal. A eficiência da lâmpada aumenta continuamente com a elevação da frequência da tensão de alimentação, até atingir um patamar para frequências acima de 5 kHz. O valor percentual do aumento de fluxo luminoso depende, entre outros fatores, das dimensões físicas do tubo de descarga.

A seguir é apresentada uma justificativa para o aumento de eficiência. A descarga em lâmpadas fluorescentes, alimentadas na frequência da rede, se extingue parcialmente toda vez que a tensão de alimentação cai abaixo do valor de pico da

tensão de arco, ou seja, em 60 Hz este processo se repete 120 vezes por segundo. O processo de restabelecimento da descarga a cada semiciclo envolve consumo de energia. Aumentando-se a frequência até um valor, no qual o semi-período da tensão é inferior à vida média das partículas da descarga, esta torna-se mais estável na região próxima dos eletrodos. Nestas condições, a lâmpada se comporta como um resistor, pois a sua tensão torna-se praticamente senoidal, em fase com a corrente, e as oscilações de alta frequência, mostradas na figura 10, desaparecem por completo.

Um reator eletrônico, representado pelo diagrama funcional da figura 12, é composto de:

- a) um conversor C.A./C.C., que transforma a tensão da rede em tensão contínua;
- b) um inversor que converte a tensão C.C. em uma tensão C.A. de alta frequência;
- c) circuitos que realizam a ignição e estabilização da corrente na lâmpada.

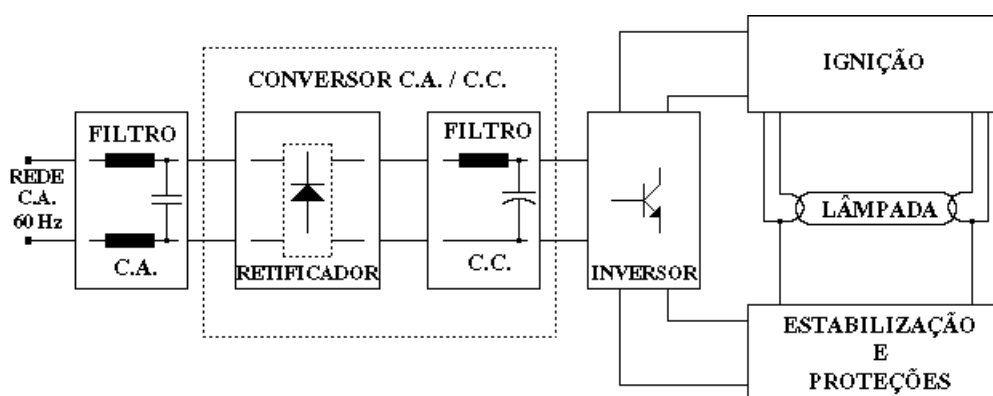


Figura 12 - Diagrama de blocos de um reator eletrônico

O inversor gera uma tensão com frequência constante, cujo valor é superior ao limiar da audição (18 kHz) e inferior a 50 kHz para evitar problemas de interferência em transmissões por rádio. A maioria dos reatores eletrônicos alimenta a lâmpada com corrente senoidal para atender as especificações de fator de crista descritas no item 2.1.1.2.

Um reator eletrônico de boa qualidade apresenta filtros nos seus terminais de alimentação com a finalidade de:

- a) evitar a circulação pela rede de correntes de frequência elevada que podem provocar interferência em sistemas de comunicação;
- b) providenciar a filtragem adequada da corrente absorvida pelo reator, eliminando os seus componentes harmônicos e mantendo-a em fase com a tensão de alimentação para assegurar um fator de potência elevado.

As funções de ignição e estabilização da corrente da lâmpada são em geral realizados por circuitos utilizando indutores e capacitores. Os indutores apresentam dimensões físicas reduzidas, uma vez que os valores de indutância são, em geral, 2 a 3 ordens de grandeza inferiores aos utilizados nos reatores indutivos convencionais.

A versatilidade e diversidade de recursos oferecidos pela eletrônica permite incluir o pré-aquecimento de filamentos e funções de proteção, as quais desligam o reator em caso de falha de ignição da lâmpada ou desconectam-no da rede em caso de curto-circuito interno.

Alguns reatores eletrônicos permitem variar a luminosidade da lâmpada (“dimming”) e possuem interfaces para sistemas de controle centralizado.

As perdas dos reatores eletrônicos são significativamente inferiores aos de seus similares indutivos. Por exemplo, o conjunto constituído de um reator indutivo de partida rápida e duas lâmpadas fluorescentes de 40 W (T12), ambas operando na condição nominal de fluxo luminoso, absorve 102 W. Já um reator eletrônico nas mesmas condições consome apenas 79 W, resultando uma economia de energia elétrica de 25%. No entanto, a escolha do reator eletrônico deve ser criteriosa, pois existem diversos modelos que alimentam a lâmpada fora da sua especificação nominal de fluxo luminoso.

As normas estabelecem que a temperatura da carcaça de reatores indutivos não pode ultrapassar de 65°C em relação a temperatura ambiente, ou seja, a temperatura da carcaça de um reator indutivo pode atingir 100°C quando a temperatura ambiente estiver a 35°C . Por outro lado, nos reatores eletrônicos comerciais a elevação de temperatura na carcaça não ultrapassa 20°C . Portanto, luminárias com reatores eletrônicos aquecem menos, reduzindo a carga térmica do

sistema de ar condicionado e proporcionando uma economia adicional de energia elétrica.

O fluxo luminoso emitido por lâmpadas fluorescentes, alimentadas por reatores indutivos, apresenta uma modulação de amplitude que acompanha a frequência da rede. Quando a luz da lâmpada ilumina um corpo que gira com uma rotação igual ou próxima à um múltiplo da frequência da rede, o observador vê a imagem de um corpo em repouso ou girando lentamente. Este fenômeno, conhecido por efeito estroboscópico, desaparece quando se utilizam reatores eletrônicos, devido a alimentação da lâmpada com alta frequência.

Os reatores eletrônicos apresentam as seguintes vantagens em relação aos seus similares indutivos:

- a) Redução do consumo de energia
- b) Aumento da eficácia luminosa da lâmpada fluorescente tubular
- c) Eliminação do efeito estroboscópico
- d) Fator de potência elevado
- e) Proteções para desligamento do reator em caso de falha
- f) Partida rápida da lâmpada
- f) Redução da carga térmica do sistema de ar condicionado
- h) Redução no peso e dimensões físicas do reator
- i) Alimentação tanto em C.A. como em C.C.
- j) Aumento da vida útil do conjunto reator + lâmpada

A principal desvantagem do reator eletrônico é o custo, que, dependendo do modelo, é 2 a 4 vezes superior ao de reatores de partida rápida. Atualmente a sua aplicação é economicamente viável em instalações de iluminação de grande porte, onde é obtida uma elevada eficiência global com a utilização de lâmpadas com “tri-fósforo” e luminárias com películas refletoras. No entanto, o aumento da produção dos reatores eletrônicos tem reduzido o seu custo e em breve deverá se tornar uma alternativa viável para pequenas instalações.

B) Lâmpada fluorescente compacta

Esta lâmpada foi introduzida no mercado no início da década de 80 e apresenta alguns detalhes construtivos que a diferenciam das lâmpadas fluorescentes tubulares convencionais, porém, seu princípio de funcionamento é idêntico.

A lâmpada fluorescente compacta é constituída de um tubo de vidro do tipo T4 ou T5, com revestimento de “tri-fósforo” e filamentos nas suas extremidades. Existem diversas formas construtivas para o tubo de descarga, sendo duas as mais comuns:

- a) um tubo único curvado em “U”;
- b) dois tubos independentes, unidos por uma ponte.

A figura 13 apresenta uma lâmpada fluorescente com dois tubos independentes, mostrando um de seus filamentos e o percurso da descarga no interior da lâmpada.

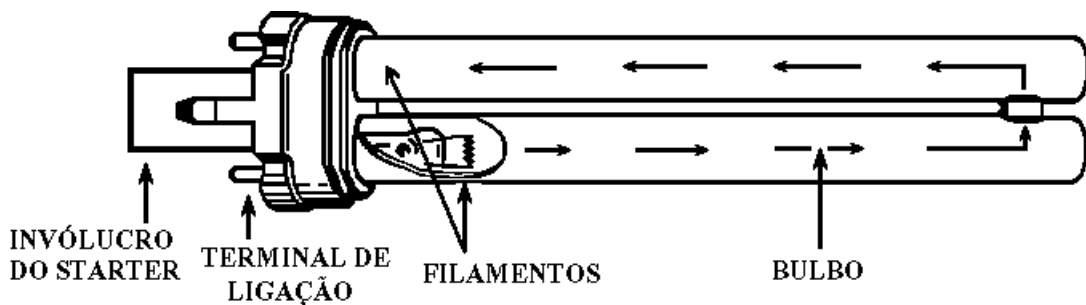


Figura 13 - Lâmpada fluorescente compacta com “starter” incorporado

A lâmpada fluorescente compacta, em geral só apresenta duas conexões elétricas, uma vez que os filamentos encontram-se ligados em série através de um “starter” (vide a figura 9), o qual fica alojado num invólucro na base da lâmpada. A estabilização da lâmpada é feita através de um reator indutivo, conectado externamente.

Algumas lâmpadas já apresentam um reator incorporado na sua base, em geral do tipo rosca Edison, que é utilizada em lâmpadas incandescentes. O reator poder ser indutivo ou eletrônico, sendo este último mais leve de forma a reduzir o peso do conjunto.

A lâmpada fluorescente compacta foi concebida para substituir a lâmpada incandescente. A tabela 2 apresenta as características de alguns modelos

comerciais de ambos os tipos de lâmpada. Os valores da eficácia luminosa do conjunto lâmpada+reator foram obtidos com um reator indutivo.

Tipo de Lâmpada	Fluorescente compacta				Incandescente			
	7	9	13	18	40	60	75	100
Potência (W)	7	9	13	18	40	60	75	100
Fluxo luminoso (lm)	400	600	900	1200	430	730	960	1380
Efic. lum. lamp. (lm/W)	57	67	69	67	10.8	12.2	12.8	13.8
Efic.lum.lamp+reat(lm/W)	36	46	60	57	-----	-----	-----	-----
Vida útil (horas)	8000	8000	8000	8000	1000	1000	1000	1000
Índice Reprodução Cor	81	81	81	81	100	100	100	100
Comprimento total (mm)	133	165	188	232	105	105	105	105

Tabela 2 - Características de algumas lâmpadas fluorescentes compactas e incandescentes

Pela tabela 2 verifica-se que a lâmpada compacta apresenta dimensões físicas similares à incandescente, porém consome um sexto da potência e apresenta uma vida útil 8 vezes maior. Apesar de seu custo ainda ser muito elevado (8 a 10 vezes superior ao de uma lâmpada incandescente), torna-se uma alternativa viável em aplicações onde se necessita de uma fonte de luz compacta e com baixo consumo de energia elétrica.

C) Lâmpada de vapor de sódio de baixa pressão

A lâmpada de sódio de baixa pressão (LPS - Low Pressure Sodium) é pouco utilizada no Brasil. Foi desenvolvida na década de 30 e utiliza um tubo de descarga de vidro boratado em forma de "U", com filamentos nas suas extremidades, contendo vapor de sódio à 7×10^{-7} atmosferas e um gás de ignição (99% neônio e 1% de argônio) à pressão de 7×10^{-4} atmosferas.

Para garantir isolamento térmico, o tubo de descarga é inserido sob vácuo no interior de um bulbo de vidro transparente, conforme mostra a figura 14.



Figura 14 - Lâmpada de vapor de sódio de baixa pressão

A lâmpada LPS é a fonte de luz artificial de maior eficácia luminosa (198 lm/W para lâmpadas de 131 W). A sua eficácia é determinada pela temperatura na parede do tubo de descarga. As lâmpadas mais modernas apresentam uma película de óxido de índio aplicada sobre a superfície interna do bulbo, que reflete a radiação infravermelha para o tubo de descarga, mantendo a temperatura da parede em 270 °C.

Ao contrário da descarga de mercúrio de baixa pressão, a radiação pela lâmpada LPS emitida é visível, sendo constituída pelas raias características do sódio, cujos comprimentos de onda são de 589 nm e 589.6 nm. Estes valores são muito próximos de 555 nm, que corresponde ao valor máximo de sensibilidade do olho (vide da figura 1). A característica monocromática da luz emitida determina o baixo índice de reprodução de cores ($R_a \leq 20$). A tabela 3 apresenta as características de alguns modelos comerciais.

Potência (W)	26	66	91	131
Fluxo luminoso (lm)	3600	10800	17500	26000
Eficácia lum.(lm/W)	138	164	192	198
Comprimento total (mm)	310	528	775	1120
Diâmetro (mm)	52	68	68	68

Tabela 3 - Características de alguns modelos de lâmpadas de vapor de sódio de baixa pressão

As características geométricas (a lâmpada de 131W tem comprimento de 1.1 m), a posição de operação (no máximo 20° em relação à horizontal), o baixo índice de reprodução de cores, o fluxo luminoso e vida útil (20000 horas) elevados tornam esta lâmpada adequada para aplicações onde são necessários níveis de iluminação elevados e os requisitos de qualidade de luz possam ser desprezados. Em geral são utilizadas na iluminação de túneis e ou em rodovias (como na Holanda e na Bélgica).

2.2.2 Lâmpadas à descarga de alta pressão

As lâmpadas à descarga de alta pressão, também conhecidas como lâmpadas HID (High Intensity Discharge) utilizam vapores metálicos (em geral mercúrio e/ou sódio)

a pressões da ordem de 1 a 10 atmosferas e operam com uma densidade de potência de arco da ordem de 20 W/cm a 200 W/cm. A radiação emitida pela descarga apresenta uma distribuição espectral contínua, sobre a qual se encontram superpostas as raias predominantes dos átomos que constituem o vapor metálico.

Existem basicamente três tipos básicos de lâmpadas comerciais: A) a lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão B) a lâmpada de sódio de alta pressão e C) as lâmpadas de alta pressão de vapores metálicos.

2.2.3 Lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão

A lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão HPM (High Pressure Mercury), apresentada na figura 15, é constituída de um tubo de descarga transparente, de dimensões reduzidas e com três eletrodos, inserido em um bulbo de vidro, revestido internamente com uma camada de "fósforo" para correção do índice de reprodução de cor.

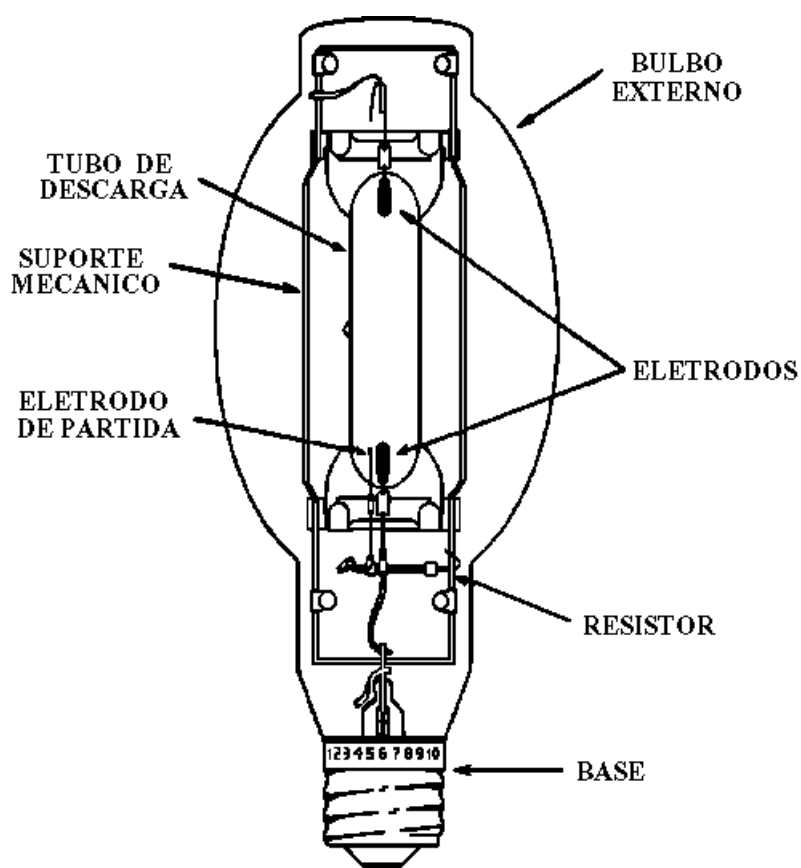


Figura 15 - Lâmpada à descarga de mercúrio de alta pressão

O tubo de descarga contém vapor de mercúrio à pressão de 2 a 4 atmosferas e argônio a 0.03 atmosferas. O argônio atua como gás de partida, reduzindo a tensão de ignição e gerando calor para vaporizar o mercúrio. O tubo de descarga é de quartzo para suportar temperaturas superiores a 340°C e evitar absorção da radiação ultravioleta emitida pela descarga.

O bulbo de vidro transparente, com formato ovóide, contém nitrogênio, formando uma atmosfera protetora para: a) reduzir a oxidação de partes metálicas, b) limitar a intensidade da radiação ultravioleta que atinge o revestimento de "fósforo" e c) melhorar as características de isolamento térmica.

A lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão apresenta três eletrodos, dois principais, um em cada extremidade do tubo de descarga, e outro auxiliar, próximo de um dos eletrodos principais, conforme mostra a figura 16. Cada eletrodo principal é constituído de fio de tungstênio, coberto com um material que emite elétrons (óxido de bário) e enrolado em dupla camada sobre uma haste do mesmo metal.

O eletrodo auxiliar encontra-se conectado em série com eletrodo principal, localizado na extremidade oposta do tubo, através de um resistor de partida. Nestas condições a tensão C.A. da rede é suficientemente elevada para realizar a ignição da descarga de argônio entre o eletrodo auxiliar e o principal adjacente, que vaporiza o mercúrio líquido e produz íons necessários para estabelecer o arco entre os eletrodos principais. Após a ignição do arco principal, a queda de tensão sobre o resistor de partida reduz a diferença de potencial entre os eletrodos auxiliar e principal adjacente, extinguindo o arco entre ambos.

A estabilização da descarga é realizada através de um reator indutivo, mostrado no diagrama da figura 16. A tensão de ignição da lâmpada aumenta com a pressão vapor de mercúrio, ou seja, com a temperatura do tubo de descarga. Quando se desliga uma lâmpada alimentada por um reator indutivo convencional, a sua reignição só é possível após 3 a 5 minutos, intervalo de tempo necessário para o esfriamento da lâmpada.

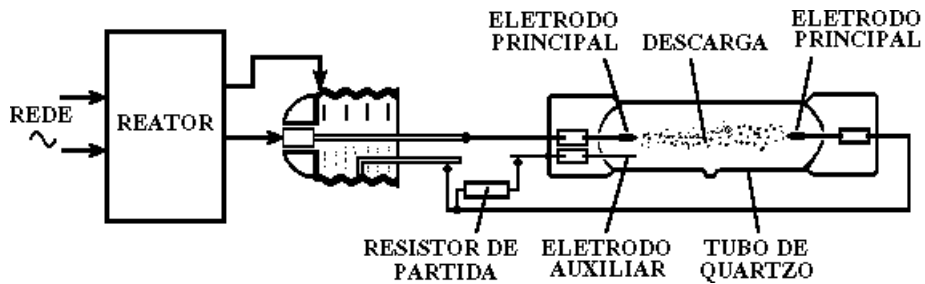


Figura - 16 Princípio de funcionamento da lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão

Nos instantes iniciais da descarga, a lâmpada emite uma luz verde clara. A intensidade luminosa aumenta gradativamente até estabilizar-se após 6 a 7 minutos, quando a luz se torna branca com uma tonalidade levemente esverdeada.

A radiação visível emitida pelo tubo de descarga apresenta um espectro contínuo, de baixa intensidade, sobre o qual se encontram superpostas as seguintes raias características do mercúrio: amarela (578 nm), verde (546.7 nm), azul (435.8 nm) e violeta (404.7 nm). A luz emitida por uma lâmpada sem revestimento de fósforo, apresenta um baixo índice de reprodução de cor ($R_a=20$), devido a ausência de raias vermelhas.

O "fósforo" utilizado em lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão apresenta as seguintes características: a) suporta temperaturas elevadas, b) banda de excitação para uma ampla faixa de comprimentos de onda na região ultravioleta e c) banda de emissão de 620 nm a 700 nm. Com o revestimento de "fósforo" consegue-se um índice de reprodução de cor $R_a=50$.

A tabela 4 apresenta as características de alguns modelos comerciais com revestimento de "fósforo" e base com rosca tipo Edison, utilizada nas lâmpadas incandescentes.

Potência (W)	50	80	125	250	400
Fluxo luminoso (lm)	1800	3700	6300	13000	22000
Eficácia lum.(lm/W)	36	46	50	52	55
Comprimento total (mm)	129	156	177	227	292
Diâmetro máximo (mm)	56	72	77	92	122
Vida útil (horas)	16000	16000	16000	16000	16000

Tabela 4 - Características de alguns modelos de lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão

A lâmpada de mercúrio apresenta fluxo luminoso elevado e vida útil longa, porém, a sua eficácia luminosa é relativamente baixa. Este tipo de lâmpada é utilizado em sistemas de iluminação de exteriores, em especial, na iluminação pública urbana.

A) Lâmpada de luz mista

A lâmpada de luz mista, mostrada da figura 17, é uma lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão que dispensa reator, substituído por filamento interno (semelhante ao de uma lâmpada incandescente), localizado no interior do bulbo conectado em série com o tubo de descarga.

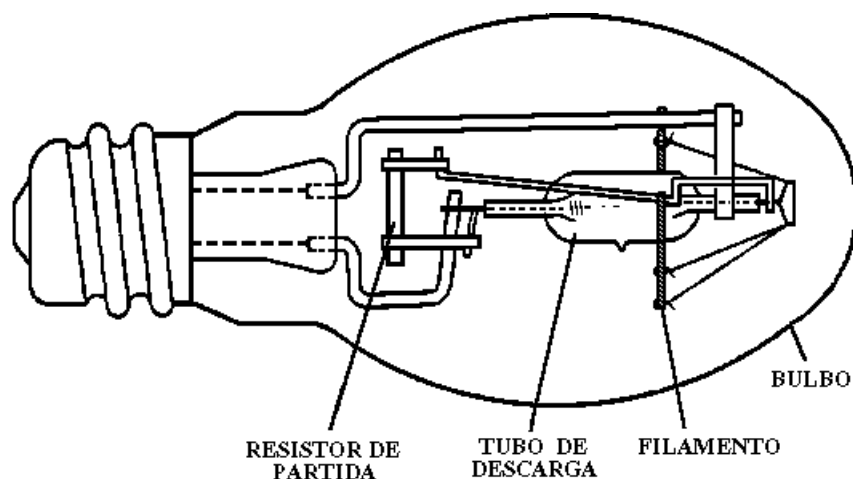


Figura 17 - Lâmpada de luz mista

Este tipo de lâmpada apresenta um índice de reprodução de cor de Ra=50 a Ra=70, porém sua eficácia luminosa é baixa em razão da potência dissipada no filamento, que determina a sua vida útil, em geral de 6000 horas a 10000 horas. A tabela 5 apresenta as características de alguns modelos comerciais com base tipo rosca Edison.

Potência (W)	160	250	500
Fluxo luminoso (lm)	3150	5500	14000
Eficácia lum.(lm/W)	20	22	28
Comprimento total (mm)	129	156	177
Diâmetro máximo (mm)	56	72	77

Tabela 5 - Características de alguns modelos de lâmpadas de luz mista

Esta lâmpada é utilizada no Brasil em sistemas de iluminação de interiores no setor comercial em substituição às lâmpadas incandescentes.

2.2.4 Lâmpada de vapor de sódio de alta pressão

A lâmpada de vapor de sódio de alta pressão HPS (“High Pressure Sodium”), é constituída de um tubo de descarga cilíndrico e translúcido, com um eletrodo em cada extremidade. O tubo de descarga é sustentado por uma estrutura mecânica, sob vácuo, no interior em um bulbo de vidro de borossilicado, com formato ovóide ou cilíndrico. A figura 18 apresenta a estrutura interna de uma lâmpada HPS com bulbo cilíndrico.

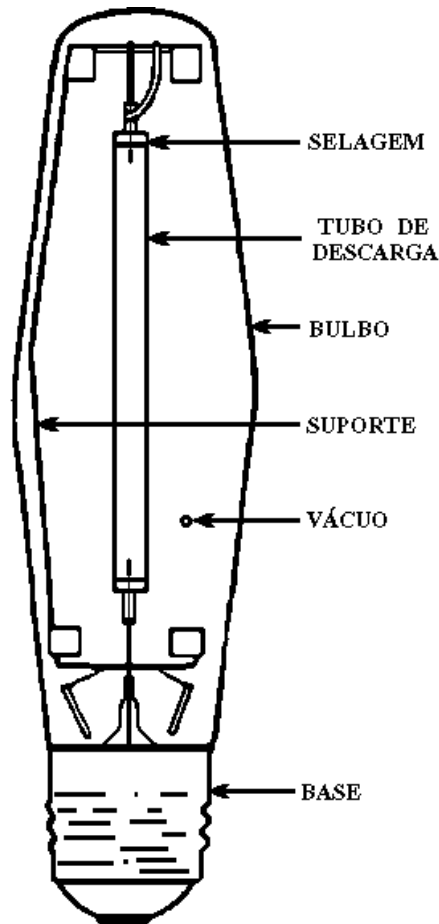


Figura 18 Lâmpada de vapor de sódio de alta pressão

O vácuo no interior do bulbo se torna necessário para a manter temperatura da parede do tubo de descarga constante, pois esta influi na distribuição espectral da luz emitida, eficácia luminosa e na tensão de arco da lâmpada.

A lâmpada de vapor de sódio de alta pressão começou a ser produzida em escala industrial na década de 60 após a síntese da alumina policristalina ou p.c.a. ("polycrystalline aluminium oxide"). O p.c.a. é um material cerâmico com elevado ponto de fusão, translúcido (coeficiente de transmissão de luz de 90%) e resistente quimicamente ao vapor de sódio sob alta pressão e a temperatura elevada.

Em lâmpadas convencionais, o tubo de descarga contém vapor de sódio a pressão 0.13 atmosferas, vapor de mercúrio a pressão de 0.5 a 2 atmosferas e xenônio, que atua como gás de partida, gerando calor para vaporizar o mercúrio e o sódio. O mercúrio, na forma de vapor e a uma pressão significativamente superior ao sódio, influi na distribuição espectral da luz emitida e reduz a tensão de arco da lâmpada.

O tubo de descarga possui uma seção reduzida, com espaço suficiente para alojar apenas um eletrodo em cada extremidade. O eletrodo, mostrado em detalhe na figura 19, é construtivamente similar ao da lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão e descrito no item 2.2.1. A haste de tungstênio é fixada por solda no interior de um tubo passante de nióbio que funciona como uma camisa e oferece um grau de liberdade para o posicionamento do tubo de descarga no interior do bulbo.

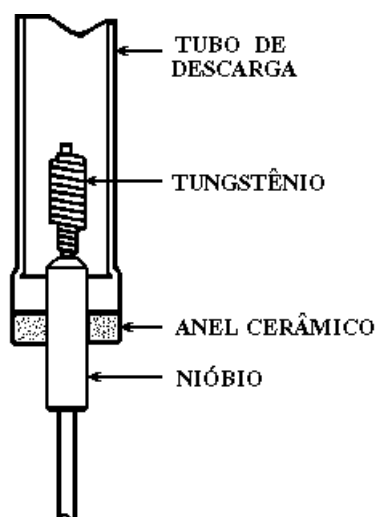


Figura 19 - Detalhes do eletrodo de uma lâmpada de vapor sódio de alta pressão

O bulbo das lâmpadas HPS é em geral transparente ou apresenta um revestimento de “fósforo” neutro para tornar a superfície difusa, sem alterar a distribuição espectral da luz emitida. A lâmpada de vapor de sódio convencional apresenta, em geral, um baixo índice de reprodução de cor ($23 < Ra < 50$), porém, uma elevada eficácia luminosa (120 lm/W para a lâmpada de 400W) e vida útil longa (24 000 horas). No entanto, existem lâmpadas especiais que apresentam um elevado índice de reprodução de cor ($Ra=85$), porém, com uma eficácia luminosa de 80 lm/W.

Para a estabilização da lâmpada, a utilização de reatores indutivos é atualmente a melhor solução sob o aspecto técnico-econômico. Para a ignição da lâmpada, aplicam-se pulsos de tensão com amplitude de 1.8 a 5.0 kilovolts e largura de 1ms a 15ms entre os seus eletrodos. Nas lâmpadas HPS convencionais, esta função é desempenhada por um dispositivo externo à lâmpada, conhecido por ignitor. Existem lâmpadas HPS especiais, as quais serão descritas no próximo item, que apresentam um dispositivo de ignição interno e são intercambiáveis (utilizam o mesmo reator) com lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão.

Os pulsos de alta tensão são aplicados entre os eletrodos da lâmpada somente até que se estabeleça a circulação de corrente pelo tubo de descarga, devendo ser inibidos em seguida. As normas internacionais especificam que o ignitor deve fornecer pelo menos um pulso a cada ciclo da rede (50 ou 60 Hz), o qual deve estar sobreposto à tensão da rede no instante de pico (máxima amplitude) da senóide, conforme mostra a figura 20.

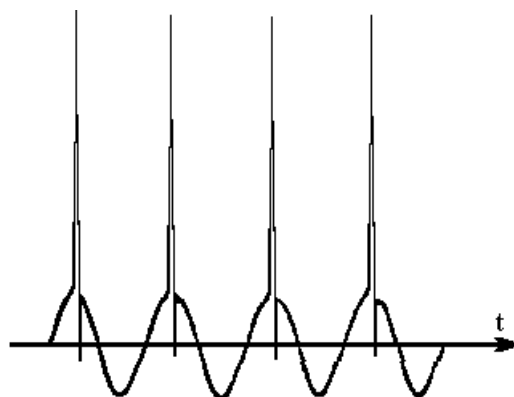
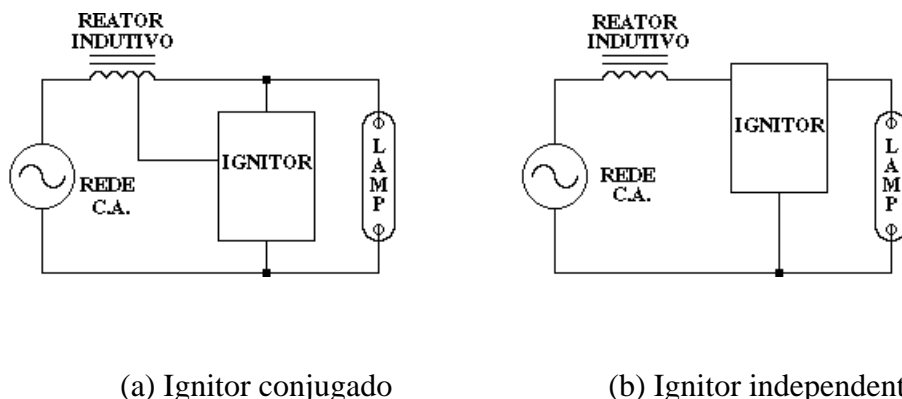


Figura 20 - Forma de onda típica da tensão de ignição aplicada nos terminais de lâmpadas HPS

A maioria dos ignitores comerciais utilizam basicamente quatro componentes: capacitores, resistores, um dispositivo eletrônico de chaveamento e um transformador elevador de tensão. Pulsos de baixa tensão são obtidos a partir da descarga de um capacitor sobre uma resistência de valor baixo, os quais são amplificados por um transformador elevador de tensão, cujos terminais do seu enrolamento secundário (com elevado número de espiras) encontram-se ligados em série com a lâmpada.

Os ignitores podem ser classificados em dois tipos: a) ignitor conjugado, utilizado em conjunto com um reator indutivo com derivação, conforme mostrado na figura 21a e b) ignitor independente do reator, apresentado na figura 21b.



(a) Ignitor conjugado

(b) Ignitor independente

Figura 21 - Ignitores para lâmpadas HPS

O ignitor conjugado é utilizado em conjunto com um reator indutivo, cujo enrolamento apresenta uma derivação com características especificadas por norma, que desempenha a função do transformador elevador de tensão.

Já a configuração independente possui um transformador com isolamento compatível incorporado ao ignitor. Desta forma o reator indutivo não fica submetido aos pulsos de alta tensão. Seu custo porém é mais elevado e o comprimento da fiação que interliga o ignitor com a lâmpada não pode exceder um dado comprimento para evitar uma atenuação excessiva na amplitude dos pulsos gerados.

A tensão de arco da lâmpada é fortemente dependente da temperatura e aumenta naturalmente ao longo da sua vida útil. Portanto, as lâmpadas HPS necessitam de luminárias com características geométricas especiais, para limitar o aquecimento do tubo de descarga pela reflexão das componentes infravermelhas do espectro geradas pela lâmpada. Caso contrário, podem ocorrer aumentos anormais da tensão de arco e uma redução significativa da vida útil da lâmpada.

Quando se desliga uma lâmpada HPS alimentada por um reator indutivo com ignitor convencionais, a sua reignição só é possível após 3 a 7 minutos, intervalo de tempo necessário para o esfriamento da lâmpada.

A tabela 6 apresenta as principais características de alguns modelos comerciais de lâmpadas HPS convencionais com bulbo em forma de ovóide utilizadas em instalações de iluminação pública.

Potência (W)	70	125	250	400
Fluxo luminoso (lm)	6500	14000	25000	47000
Eficácia lum.(lm/W)	93	93	100	117
Comprimento total (mm)	156	227	227	292
Diâmetro máximo (mm)	72	92	92	122
Vida útil (horas)	24000	24000	24000	24000

Tabela 6 - Características de alguns modelos de lâmpadas HPS

Pode-se verificar que a eficácia da lâmpada HPS é quase o dobro da lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão. Por outro lado, o investimento inicial para uma instalação com lâmpadas HPS é significativamente superior, mas a economia de energia ao longo da vida útil viabiliza a instalação.

A) Lâmpada HPS com dispositivo de ignição interno

As lâmpadas HPS com dispositivo de ignição interno são projetadas para serem intercambiáveis com lâmpadas de vapor de mercúrio, ou seja, utilizando o mesmo reator e dispensando o ignitor.

O tubo descarga é monolítico e similar ao da lâmpada HPS convencional. Geralmente adiciona-se argônio ou neônio para reduzir a tensão de ignição e utiliza-se uma concentração de mercúrio mais elevada, para se obter uma tensão de arco próxima à da lâmpada de mercúrio de alta pressão.

O dispositivo de ignição, ilustrado pela figura 22, é constituído de uma chave térmica (disjuntor bimetálico), inicialmente em curto-circuito e uma espiral de fio envolvendo o tubo de descarga. A circulação de corrente elétrica pela espiral impõe uma distribuição de potencial eletrostática no interior do tubo de descarga, que reduz a tensão de ignição da lâmpada. Após a ignição, o tubo de descarga aquece e a espiral é eletricamente desconectada do circuito pelo disjuntor térmico.

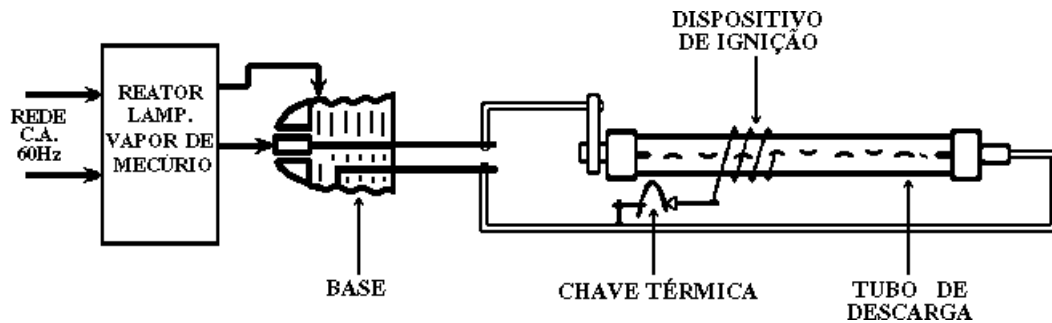


Figura 22 - Estrutura interna da lâmpada HPS com ignitor incorporado

As lâmpadas HPS com ignitor incorporado de 110W, 210W e 350W podem ser utilizadas no lugar das lâmpadas de mercúrio de alta pressão de 125W, 250W e 400W respectivamente. A eficácia da lâmpada HPS com ignitor interno é similar à da HPS convencional, porém, sua vida útil é 30% menor.

2.2.5 Lâmpada de vapores metálicos

A lâmpada de vapor metálico HPMH (High Pressure Metal Halide) é construtivamente semelhante à lâmpada de mercúrio de alta pressão, ou seja, utiliza um tubo de descarga de sílica fundida inserida no interior de um bulbo de vidro transparente, em geral com formato ovóide.

A maioria das lâmpadas com potências mais elevadas necessitam de um ignitor externo, similar ao das lâmpadas HPS. Algumas lâmpadas dispensam ignitor, pois apresentam três eletrodos, dois principais, um em cada extremidade do tubo de descarga, e outro auxiliar, próximo de um dos eletrodos principais.

A estabilização da descarga é realizada através de um reator indutivo. Quando se desliga uma lâmpada alimentada por um reator indutivo convencional, a sua reignição só é possível após 3 a 5 minutos, intervalo de tempo necessário para o esfriamento da lâmpada.

O tubo de descarga contém vapor de mercúrio, um gás para ignição (argônio) e haletos metálicos. A temperatura de vaporização dos metais é em geral superior à máxima temperatura suportável pelo material do tubo de descarga. Já o metal na forma de um haleto vaporiza a uma temperatura significativamente inferior.

Geralmente utilizam-se iodetos, pois são quimicamente menos reativos. A adição de metais introduz raias no espectro que melhoram a características reprodução de cores da lâmpada. A composição dos haletos geralmente não é fornecida pelo fabricante. As lâmpadas de vapor metálico apresentam uma eficácia luminosa de 65 a 100 lm/W e um índice de reprodução de cores $R_a > 80$. A sua vida útil é em geral inferior a 8000 horas. São comercialmente disponíveis lâmpadas de 70 W a 2000 W, sendo utilizadas em aplicações onde a reprodução de cores é determinante, como por exemplo, em estúdios cinematográficos, iluminação de vitrines e na iluminação de eventos com transmissão pela televisão.

3. Bibliografia

- [1] Kaufman, J. E. Hayes, H., ed., **IES Lighting Handbook**, New York, Illuminating Engineering Society of North America, 1981, Vol.1.
- [2] Elenbaas, W., **Light Sources**, Crane Rusch & Company, New York, 1972.
- [3] Henderson, S. R., Masden A. M., **Lamps and Lighting**, Crane Rusch & Company, New York, 2. edition, 1972.
- [4] Coaton, J.R., **Special Issue on Lighting Sources Technology**, IEE Proceedings, Part A, Vol 127, No. 3, April 1981.
- [5] Groot, J., van Vliet, J., **The High Pressure Sodium Lamp**, London MacMillan Educational, 1986.
- [6] Waymouth J. F., Levin, R. E., **Designers Handbook, Light Sources and Applications**, Sylvania GTE Products, Danvers, 1980.